

小型磁吸附爬壁机器人的设计与实验验证

唐陈伟, 李建磊, 姚红良, 贾如玉

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 针对传统爬壁机器人结构复杂、体积庞大等问题,设计了一种能够在竖直壁面上移动的新型小型磁吸附爬壁机器人,可满足在狭小空间内运动的需求。基于振动驱动理论,设计了具有扭转特性的足部结构并采用磁吸附的黏附机制,建立了爬壁机器人的动力学模型。通过数值仿真,分析了激振频率和外部负载对机器人运动速度的影响规律,结果表明,在无负载时,机器人最大爬壁速度可达58.7 mm/s,而在负载0.7倍自身质量条件下,其最大爬壁速度为44.9 mm/s。实验验证进一步表明,机器人在无负载和负载条件下的最大爬壁速度分别为56.5和30.2 mm/s,并通过调节激振频率,可以实现对机器人运动速度和方向的有效控制。

关键词: 爬壁机器人; 小型机器人; 振动驱动; 磁吸附; 扭转特性

中图分类号: TD 451

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2025)01-0068-08

Design and Experimental Verification of Small-Scale Magnetic Adsorption Wall-Climbing Robots

TANG Chen-wei, LI Jian-lei, YAO Hong-liang, JIA Ru-yu

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: YAO Hong-liang, E-mail: hlyao@mail.neu.edu.cn)

Abstract: To address the challenges of complex structures and large sizes in traditional wall-climbing robots, a novel small-scale magnetic adsorption wall-climbing robot was designed, capable of maneuvering on vertical surfaces and meeting the operational requirements in confined spaces. Based on the vibration-driven theory, a foot structure with torsional characteristics was designed, incorporating a magnetic adsorption mechanism. A dynamic model of the wall-climbing robot was established, and numerical simulations were performed to analyze the effect of excitation frequency and external load on the robot's motion speed. The results indicated that the robot achieves the maximum climbing speed of 58.7 mm/s under no-load conditions and 44.9 mm/s when carrying a load equivalent to 0.7 times its own mass. Experimental validation further demonstrated the maximum climbing speeds of 56.5 and 30.2 mm/s under no-load and loaded conditions, respectively. Additionally, by adjusting the excitation frequency, the robot's motion speed and direction can be effectively controlled.

Key words: wall-climbing robot; small-scale robot; vibration-driven; magnetic adsorption; torsional characteristics

近年来,爬壁机器人被广泛应用于清洁、运输、检测和维修等领域,代替人类在复杂危险环境下进行工作,从而降低了人工成本,提高工作效率,尤其在一些人工无法直接进行工作的恶劣条件下,爬壁机器人的研究显得尤为重要^[1]。

爬壁机器人的移动方式主要分为3类:轮式、

履带式以及足式^[2-4],广泛应用的壁面粘附机制包括:负压吸附式、磁吸附式以及仿生吸附式等^[5-8]。La等^[9]设计了一种内嵌永磁体的轮式爬壁机器人,并装有柔性骨架和负载分散机构,使得机器人具有更大的灵活性和较高的承载能力。Huang等^[10]研究的一种带有自动校正功能的船

船检测用履带式爬壁机器人,可以检测实际轨迹和设计轨迹之间存在的差异并对偏移值进行校正. Shi 等^[11]提出的一种六自由度负压吸附式仿生机器人,采用 D-H 矩阵优化步态,运动平稳,可实现水平—竖直—水平的运动转换,具有一定的越障能力. Xu 等^[12]设计了一种仿生钩爪式爬壁机器人,通过对粗糙面的三维仿真,利用特征参数提取方法,给出钩爪稳定抓取壁面所需的判别条件.这些爬壁机器人虽然有较大的承载能力,但是体积相对较大,无法在一些狭窄空间内开展工作,因此对小型爬壁机器人的研究显得尤为重要.

为了设计具有较强环境适应性的机器人,研究人员从自然生物(如蚯蚓^[13-14]、尺蠖^[15]、蛇^[16]等)的运动中获得灵感,提出了一种新的振动驱动系统^[17].振动驱动系统是指由于内部质量的周期性振荡,在不同方向上产生不等的摩擦阻力,实现系统的净位移,其没有复杂的传动机构,因而可以使机器人小型化,适应不同的工作环境^[18-19]. Majewski 等^[20]研究了双振动电机驱动下的微型水平移动机器人的动力学特性,研究了电机转速、摩擦系数等参数对机器人速度的影响规律. Guo 等^[21]和 Yan 等^[22]设计了一种用于肠道检查的振动驱动胶囊机器人,研究了不同频率下的平均前进速度.郭俞良等^[23]提出了一种可用于垂直管道检测的振动驱动机器人,通过改变电磁铁的激励频率,即可实现对机器人的速度控制. Yaguchi 等^[24]设计了一种双振动元件协同作用的振动驱动系统,无需电机,仅依靠记忆合金弹簧和永磁铁就可实现在复杂台阶垂直面上运动.

根据上述研究成果,本文通过将振动驱动技术与常见的壁面粘附机制相结合,设计了一种新型的小型振动驱动磁吸附爬壁机器人,结构简单轻巧,没有复杂的传动机构,可在处于狭窄空间内的钢结构壁面上实现快速往复运动,并在不牺牲机动性的情况下,额外负载 0.7 倍自身质量的重物沿壁面爬行.

1 结构设计与原理分析

1.1 结构设计

振动驱动机器人系统主要由电机基座、偏心电机(驱动器)、永磁铁、足部以及安装在其底端的橡胶材料组成,如图 1a 所示,其基本尺寸为 80 mm×50 mm×30 mm,整体质量为 115 g.

电机基座用于固定偏心电机、永磁铁以及机器人的足部,承载电机产生的激振力,并为增加外部负载预留空间;偏心电机提供系统运动所需的周期性激振力,是机器人系统的驱动器;两列具有一定倾斜角度的足部对称分布于电机基座两侧,如图 1b 所示.由于机器人足部采用 3D 打印制造完成,为聚乳酸(PLA)材料,与壁面间的摩擦系数较小,故通过在足部底端安装橡胶材料以增加足部与壁面接触的摩擦系数;固定在基座底部的永磁铁可将机器人整体吸附于钢结构壁面.

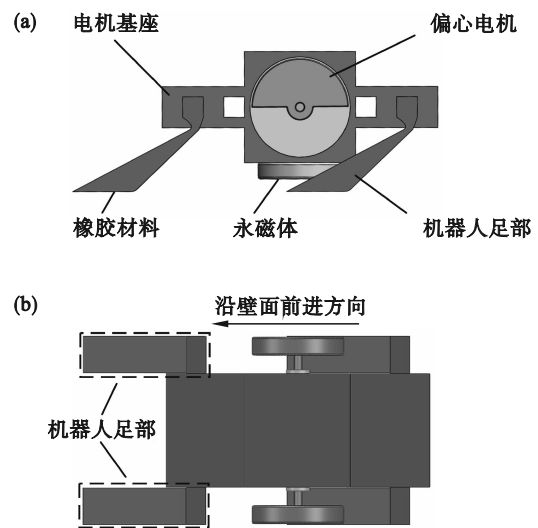


图 1 机器人整体结构模型

Fig. 1 Structural model of the robot

(a)—主视图; (b)—俯视图.

1.2 原理分析

固定在电机基座底部的永磁铁提供了机器人吸附在钢结构壁面上所需的压力.质量为 m 的振子质心距离电机旋转轴中心距离为 e ,当电机通电后以转速 ω 进行旋转时,会产生大小为 $m\omega^2$ 的不平衡激振力,在水平和竖直方向都具有力分量,如图 2 所示.

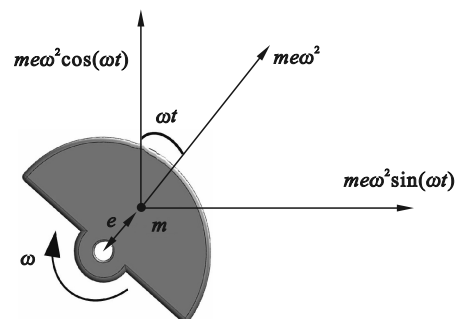


图 2 激振力及分量

Fig. 2 Exciting force and components

垂直于壁面方向的激振力分量引起足部变形和机器人整体在该方向上的振动.与壁面法向

成一定倾斜角度的机器人足部可等效为扭转弹簧,具有扭转特性,通过变形可将部分激振力分量转化为内部势能,不仅可以在壁面法向上施加恢复扭矩,使机器人在该方向上保持稳定,同时也为机器人沿壁面上升提供动能。

以平行于钢质壁面竖直向上为正方向,对应地,竖直向下为负方向.机器人的振动通过倾斜的足部在壁面法向产生非对称的法向力,进而在平行于壁面方向产生不对等的摩擦力,结合沿该方向上驱动器产生的激振力分量,共同作用于机器人系统,推动其上升或下降。

2 动力学建模

2.1 二维刚体模型

为实现整体轻量化和部件可更换的特点,除驱动器外,机器人的电机基座及足部均由采用 PLA 材料的 3D 打印制造.为了便于更直观地分析机器人的运动过程,可将支撑电机基座的足部理想化为扭转弹簧,质量可忽略不计。

图 3 所示为初始状态下振动驱动机器人系统二维刚体动力学模型,由质量为 m_0 的主体、质量为 m 的偏心质量块以及两个长度为 l 的支撑元件组成.其中,支撑元件通过扭转刚度为 k 的弹簧连接到主体上, F_c 为永磁铁与壁面之间的引力, g 为重力加速度, N 为足部底端所受的法向反作用力, F_R 为机器人足部受到的壁面对其摩擦力, θ 是足部相对于壁面法向的倾斜角度,且始终与壁面保持接触。

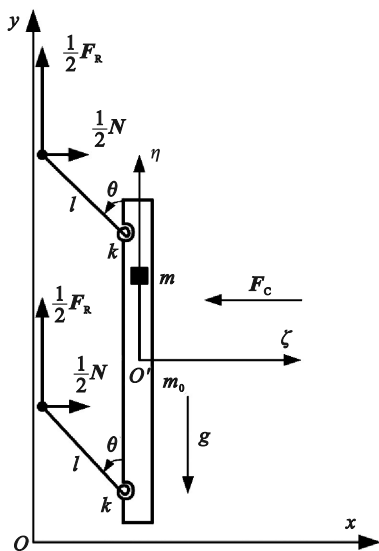


图 3 机器人系统二维刚体动力学模型

Fig. 3 Two dimensional rigid body dynamics model of the robot system

在平面中引入 2 个笛卡尔坐标系-固定参考系 (Oxy) 和附加体参考系 ($O'\zeta\eta$), s_x 和 s_y 分别表示机器人系统中驱动器部件在水平和竖直方向的位移, s_ζ 和 s_η 用于描述驱动器偏心质量块在水平和竖直方向的位移。

鉴于前、后足部受力大小以及变形程度近似相同,故足部与壁面接触点相对于驱动器的位移可表示为

$$s_{y_j} = s_y + l \cos \theta, \quad j = 1, 2. \quad (1)$$

相应地,速度表示为

$$\dot{s}_{y_j} = \dot{s}_y + l \cos \theta, \quad j = 1, 2. \quad (2)$$

2.2 动力学模型

初始状态下,机器人通过永磁铁引力 F_c 的作用吸附于壁面,处于静止平衡状态,此时足部相对于设计角度 45° 发生轻微扭转,扭转后的倾斜角度为 θ_0 ,满足平衡方程:

$$k(45^\circ - \theta_0) = Nl \cos \theta_0 + F_R l \sin \theta_0. \quad (3)$$

其中: $F_R = \mu(m + m_0)g$, μ 为足部与壁面接触的摩擦系数; $N = F_c$.

机器人系统的动能为

$$T = \frac{1}{2} m_0 (\dot{s}_x^2 + \dot{s}_y^2) + \frac{1}{2} m [(\dot{s}_x + \dot{s}_\zeta)^2 + (\dot{s}_y + \dot{s}_\eta)^2]. \quad (4)$$

势能为

$$V = m_0 g s_y + m g (s_y + s_\eta) + \frac{1}{2} k (\theta_0 - \theta)^2. \quad (5)$$

其中: $s_\zeta = e \sin(\omega t)$, $s_\eta = e \cos(\omega t)$, ω 表示电机转速, e 为电机偏心质量块质心到电机轴的距离; θ_0 表示机器人足部在永磁铁引力作用下发生扭转后的初始倾斜角度.由于足部始终与壁面保持接触,所以在 x 方向存在完整约束: $s_x = l \sin \theta$, 该系统为二自由度非线性系统。

作用在足部底端的法向反作用力可表示为

$$N = F_c + (m + m_0) \ddot{s}_x + m \ddot{s}_\zeta. \quad (6)$$

为简化分析,假定滑动摩擦近似等于最大静摩擦力,作用在足部底端的摩擦力为

$$F_R = \begin{cases} -\mu N \text{sign}(\dot{s}_y - l \dot{\theta} \sin \theta), & \dot{s}_y - l \dot{\theta} \sin \theta \neq 0; \\ \mu N, & \dot{s}_y - l \dot{\theta} \sin \theta = 0. \end{cases} \quad (7)$$

式中, sign 为符号函数。

第二类拉格朗日方程为

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i. \quad (8)$$

式中: $L = T - V$; q_i 为广义坐标; Q_i 为广义力。

利用第二类拉格朗日方程计算系统的振动微分方程为

$$(m+m_0)\ddot{s}_y+m\ddot{s}_\eta+(m+m_0)g=F_R, \quad (9)$$

$$(m+m_0)l^2\ddot{\theta}\cos^2\theta-(m+m_0)l^2\dot{\theta}^2\cdot\sin\theta\cos\theta+m\ddot{s}_z l\cos\theta-k(\theta_0-\theta)=-F_R l\sin\theta. \quad (10)$$

驱动器在壁面法向的位移可用 $s_x=l\sin\theta$ 表示,为保证机器人足部在运动过程中始终与壁面保持接触,驱动器激振力引起的足部倾斜角度 θ 变化应满足

$$l\sin\theta\leq l\sin 45^\circ. \quad (11)$$

即足部倾斜角度在运动过程中始终小于初始设计角度.

3 仿真分析

由于驱动器产生的激励力、机器人所受摩擦力大小和方向是周期性变化的,运动模型较为复杂,故考虑采用数值方法来描述机器人的运动过程.

采用带自适应步长的 Runge-Kutta 方法对机器人的运动过程进行仿真.由于机器人沿壁面法向的位移较小,对永磁铁与壁面间的引力影响可

忽略不计,为简化计算,永磁铁与壁面之间的引力 F_C 可看作定值.驱动器的位移用 s_y 表示,初始值置为 0,以足部底端与壁面接触点的位移 $s_y+l\cos\theta$ 表示机器人整体位移,为方便比较驱动器与机器人整体之间的运动趋势关系,可将机器人整体位移减去初始偏移值 $l\cos\theta_0$.

由表 1 给出的仿真参数对式(9)和式(10)进行数值仿真.

表 1 仿真参数
Table 1 Simulation parameters

参数	值	参数	值
m/g	15	$\theta_0/(^\circ)$	43
m_0/g	100	e/mm	4.6
N_c/N	4	μ	0.6
l/mm	20	$k/(N\cdot m\cdot rad^{-1})$	1.8

3.1 激振频率影响分析

在满足足部始终与壁面保持接触的前提下,机器人系统在驱动器激振频率分别为 22.7 和 28 Hz 时的运动仿真结果如图 4 所示.

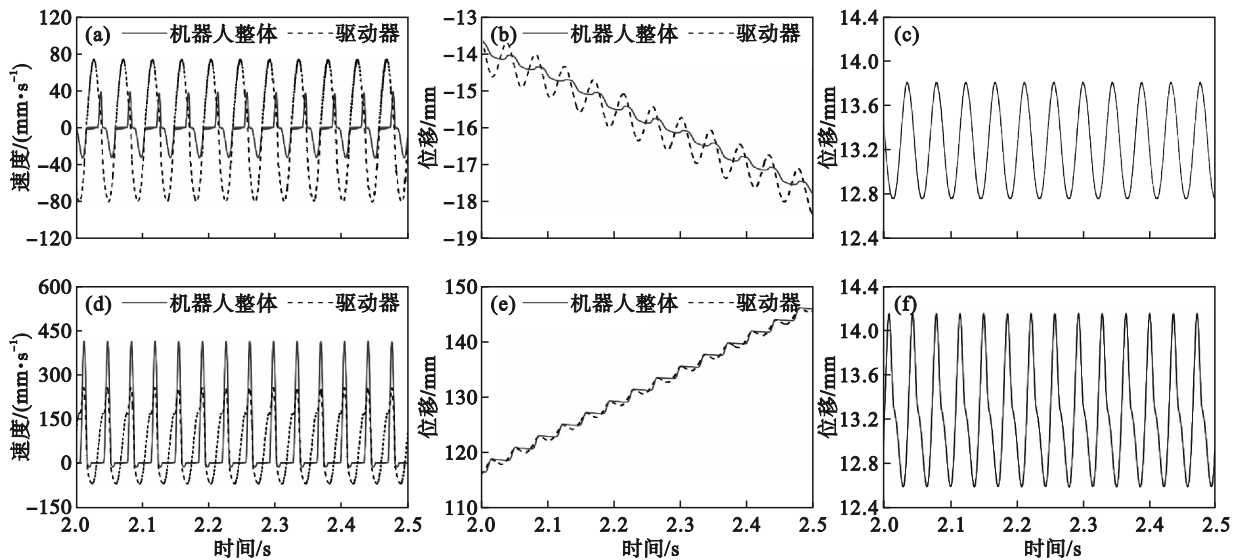


图 4 不同激振频率下机器人运动分析

Fig. 4 Analysis of robot motion under different excitation frequencies

- (a)—激振频率 22.7 Hz,沿壁面方向速度;
- (b)—激振频率 22.7 Hz,沿壁面方向位移;
- (c)—激振频率 22.7 Hz,驱动器沿壁面法向位移;
- (d)—激振频率 28 Hz,沿壁面方向速度;
- (e)—激振频率 28 Hz,沿壁面方向位移;
- (f)—激振频率 28 Hz,驱动器沿壁面法向位移.

由图 4a,4d 可知,在一个运动周期内,机器人整体沿壁面方向的运动速度会在某一时间段接近于 0,但时而正时而负,处于黏滞-滑移相互转换的状态,导致速度在该时间段内围绕零点上下跳跃的原因是驱动器产生的沿壁面法向的激振

力分量与机器人整体在该方向上的惯性振动合力发生波动,使得足部底端的法向反作用力产生波动,进而导致足部与壁面接触的摩擦力在该时间段内发生急剧变化,最终产生这种“颤振”现象.

机器人在每个运动周期内都经历上升和下降两个过程,当上升的距离大于下降的距离时,机器人在1个周期内是沿壁面上升的,反之,则下降,结果如图4b,4e所示.

驱动器沿壁面法向的位移随时间变化如图4c,4f所示,随着激振频率的增大,驱动器沿壁面法向的振动幅度也逐渐增大,并在频率为28 Hz

时,足部倾角在变化过程中的最大值达到初始设计角度 45° ,处于与壁面失去接触临界点.

利用MATLAB对机器人在驱动器激振频率为10~28 Hz范围内的运动情况进行数值仿真,不同激振频率下机器人沿壁面竖直方向运动的平均速度如图5a所示,图5b~5f展示了机器人整体与驱动器在几种不同频率下2~2.5 s内的位移情况.

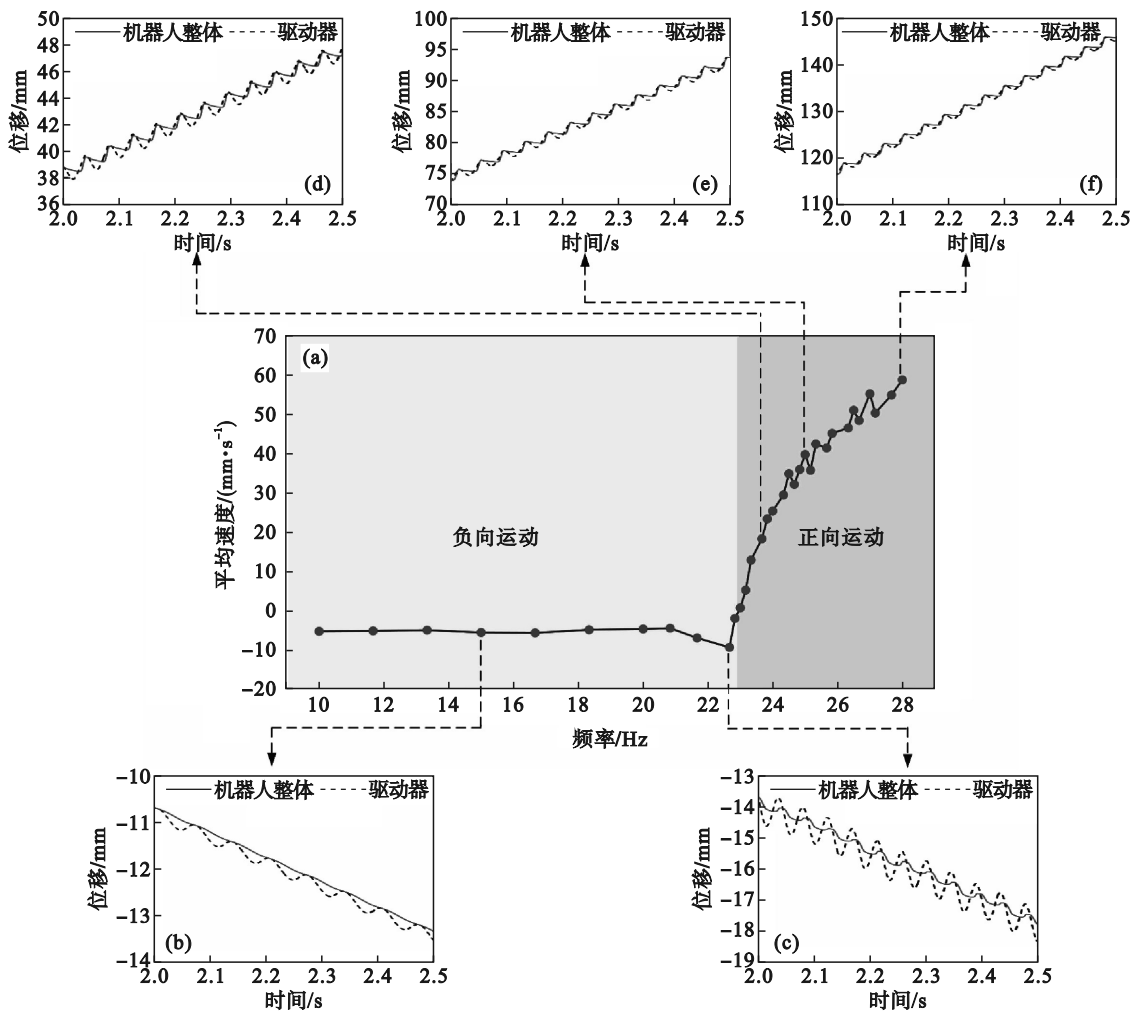


图5 机器人系统的激振频率-平均速度响应曲线

Fig. 5 Excitation frequency-average speed response curve of the robot system

(a)—不同频率下的平均速度; (b)—频率为15 Hz下的位移情况; (c)—频率为22.7 Hz下的位移情况; (d)—频率为23.7 Hz下的位移情况; (e)—频率为25 Hz下的位移情况; (f)—频率为28 Hz下的位移情况.

在频率为10~23 Hz区间内,机器人沿壁面负向运动,其中,在10~20.7 Hz时,平均速度基本保持恒定,随着频率增大,平均速度逐渐减小,并在22.7 Hz时,速度达到最小值 -9.5 mm/s,即机器人沿壁面下降达到最大速度.当激振频率为23~24.5 Hz时,机器人沿壁面上升速度快速增加,随着频率继续增大,速度增加趋势变缓,在28 Hz时,实现最大爬壁速度 58.7 mm/s.

3.2 负载能力分析

为了实现振动驱动机器人的多用途应用,如携带检测装备对壁面进行检测或铺设线缆等,需要探究其在一定负载条件下的爬壁能力.

在保证爬壁效率的前提下,选择机器人的外部负载质量范围为0~80 g,分别对机器人在负载20,40,60和80 g条件下的沿壁面竖直方向运动能力进行数值模拟,在10~28 Hz激振频率下的机器人运动平均速度结果如图6所示.

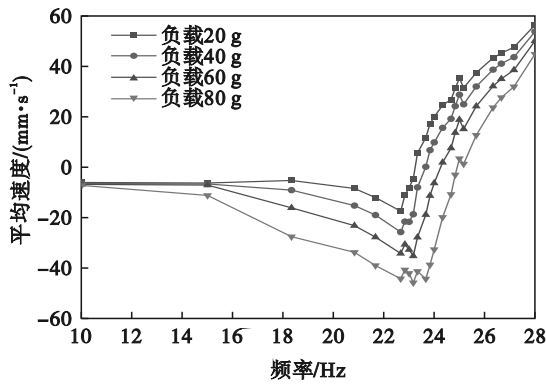


图6 外部负载对机器人运动影响分析
Fig. 6 Analysis of the effect of external load on robot motion

对仿真结果分析可知,随着外部负载质量的增大,机器人沿壁面最大上升速度逐渐减小,最大下降速度逐渐增大,同时沿壁面上升所需的驱动器激振频率初始值逐渐增大,但是在激振频率低于 15 Hz 时,外部负载的变化对机器人的运动影响较小.

在外部负载质量分别为 20, 40, 60 和 80 g 时,振动驱动机器人对应的最大正向平均速度分别为 56.5, 53.9, 50.2 和 44.9 mm/s,最大负向平均速度分别为 -17.2, -25.4, -34.9 和 -45.5 mm/s. 可以发现,在外部负载增加的情况下,机器人沿壁面负向运动的最大速度变化呈现明显的动态性,而其正向运动的最大平均速度变化则较为温和,因此外部负载对机器人下降速度阈值影响较大,而对上升速度阈值影响较小.

4 实验验证

4.1 实验装置

振动驱动机器人的整体结构采用 3D 打印制造,为了增加机器人与壁面之间的摩擦力,提高其运动表现,在足部底端安装了橡胶材料,机器人整体结构及实验装置如图 7 所示. 直流电源提供偏心电机(驱动器)转动所需电压,将钢质壁面垂直固定在实验台上,激光位移传感器安装在钢质壁面的顶部,处于机器人正上方位置,用于记录机器人的运动数据.

4.2 激振频率影响验证分析

机器人系统参数设置与表 1 相同,驱动器通电后,在一定激振频率范围内用激光位移传感器记录机器人运动时的位移与时间,将传感器数据进行处理后获得的机器人运动平均速度与频率

关系如图 8 所示. 在电机激振频率为 22.7 Hz 时,机器人负向运动的速度达到最大值 -13.6 mm/s,当激振频率为 27 Hz 时,机器人达到最大正向运动速度 56.5 mm/s.

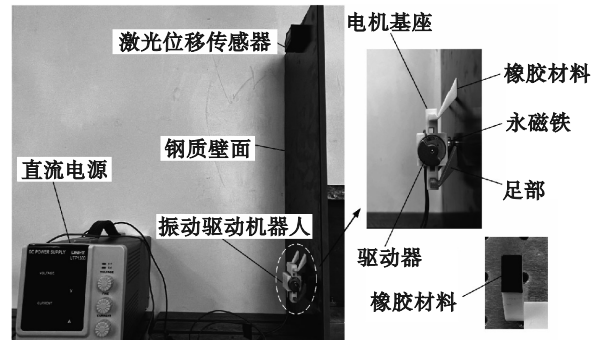


图7 实验装置
Fig. 7 Experimental device

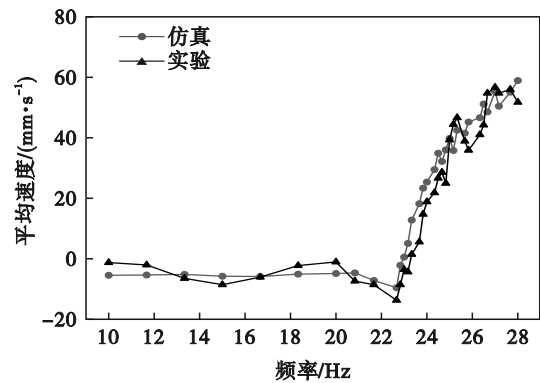


图8 机器人系统运动仿真与实验对比结果
Fig. 8 Simulation and experimental comparison results of robot system motion

对比仿真与实验数据结果可以看出,在较低频率下,机器人负向运动的平均速度存在一定波动. 整个频率范围内,平均速度的实验值与仿真值相比数值偏低,但差异不大. 导致这些误差的原因可能是低频条件下,壁面的不均匀摩擦对机器人运动表现影响较大;此外,实验采用的双扇头偏心电机非严格对称,会造成一定的速度损失. 但从整体上来看,机器人的实际运动趋势与仿真结果基本吻合,数值相近,可以证明仿真结果的正确性.

4.3 负载能力验证分析

通过在机器人电机基座处挂载不同质量的质量块对其负载能力进行实验验证,机器人在不同外部负载下的运动情况如图 9 所示. 随着外部负载逐渐增大,机器人系统在各个频率下的平均运动速度逐渐减小. 由图 9 与图 6 对比可知,实验结果与仿真结果偏差较大,整体变化趋势与仿真

结果相近,证明了在不同负载情况下机器人仿真结果的正确性。

具体地,当机器人系统外部负载质量分别为 20, 40, 60 和 80 g 时,沿壁面运动的最大正向速度分别为 50.5, 44.3, 39.5 和 30.2 mm/s,最大负向速度分别为 -19.8, -29.1, -38.3 和 -52.4 mm/s. 容易发现,随着外部负载逐渐增大,机器人沿壁面最大上升速度,即最大正向速度逐渐减小,最大负向速度逐渐增大,其中最大负向速度随负载的变化更为显著。

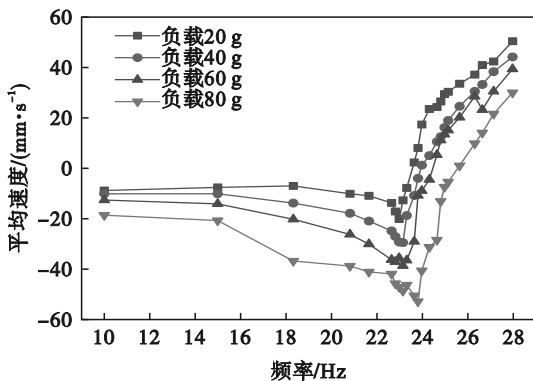


图 9 外部负载对机器人运动影响实验结果

Fig. 9 Experimental results of the effect of external load on robot motion

机器人在不同负载条件下沿壁面正向和负向运动的速度极值的仿真与实验结果如图 10 所示. 可以看出,机器人沿壁面运动的最大速度,实验值普遍略小于仿真值,造成这一结果的原因除了之前提到的壁面不均匀以及驱动器偏心质量块不完全对称造成速度损失外,还有可能是外部负载质量块的增加导致机器人质量分布不均衡,从而增大了机器人前、后足部受力不均匀。

机器人在不同外部负载条件下沿壁面运动能力的实验结果与仿真结果相比存在一定偏差,

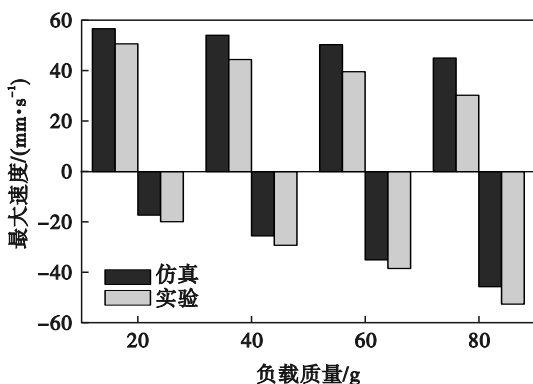


图 10 不同负载对机器人速度极值影响

Fig. 10 Effect of different loads on the extreme speed of the robot

但两者数值相差不大,且整体运动趋势相同,因此验证了仿真的正确性。

5 结 论

1) 基于振动驱动原理设计了一种小型爬壁机器人,对其运动原理进行分析并建立机器人的动力学模型.利用四阶 Runge-Kutta 方法对机器人在自身质量和不同外部负载条件下的爬壁能力进行仿真,结果表明,机器人在无负载和外部负载 0.7 倍自身质量条件下分别可实现最大 58.7 和 44.9 mm/s 的爬壁速度。

2) 通过实验验证了机器人在自身质量和不同外部负载条件下的爬壁性能,结果表明,机器人在无负载和负载 0.7 倍自身质量条件下的最大爬壁速度分别为 56.5 和 30.2 mm/s,实验结果与仿真结果具有很好的一致性,证明了设计的可行性。

3) 该爬壁机器人结构简单、质量轻巧,在较大负载条件下仍可保持较高爬壁速度,为小型爬壁机器人的研究提供了一种有效的技术方案。

参考文献:

- [1] Silva M F, Tenreiro J A. A survey of technologies and applications for climbing robots locomotion and adhesion [C]//Climbing and Walking Robots. London, 2010: 1-22.
- [2] Liu Y H, Lim B, Lee J W, et al. Steerable dry-adhesive linkage-type wall-climbing robot [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2020, 153: 103987.
- [3] Lee G, Kim H, Seo K, et al. MultiTrack: a multi-linked track robot with suction adhesion for climbing and transition [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, 72: 207-216.
- [4] Altaf M, Ahmad E, Xu Y R, et al. Design of a climbing robot platform with protection device [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2017, 14(4): 1-14.
- [5] Hu J Y, Han X, Tao Y R, et al. A magnetic crawler wall-climbing robot with capacity of high payload on the convex surface [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2022, 148: 103907.
- [6] Zhou Q, Li X. Experimental investigation on climbing robot using rotation-flow adsorption unit [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2018, 105: 112-120.
- [7] Sun J, Bauman L, Yu L, et al. Gecko-and-inchworm-inspired untethered soft robot for climbing on walls and ceilings [J]. *Cell Reports Physical Science*, 2023, 4(2): 101241.
- [8] Navaprakash N, Ramachandiraiah U, Muthukumar G, et al. Modeling and experimental analysis of suction pressure generated by active suction chamber based wall climbing robot with a novel bottom restrictor [J]. *Procedia Computer Science*, 2018, 133: 847-854.
- [9] La H M, Dinh T H, Pham N H, et al. Automated robotic monitoring and inspection of steel structures and bridges [J]. *Robotica*, 2019, 37(5): 947-967.
- [10] Huang H C, Li D H, Xue Z, et al. Design and performance analysis of a tracked wall-climbing robot for ship inspection

- in shipbuilding[J].*Ocean Engineering*,2017,131:224-230.
- [11] Shi X T, Xu L, Xu H B, et al. A 6-DOF humanoid wall-climbing robot with flexible adsorption feet based on negative pressure suction [J]. *Mechatronics*, 2022, 87: 102889.
- [12] Xu F Y, Meng F C, Jiang Q S, et al. Grappling claws for a robot to climb rough wall surfaces: mechanical design, grasping algorithm, and experiments [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2020, 128: 103501.
- [13] Gray J, Lissmann H W. Locomotory reflexes in the earthworm [J]. *Journal of Experimental Biology*, 1938, 15 (4) : 507-517.
- [14] Quillin K J. Kinematic scaling of locomotion by hydrostatic animals: ontogeny of peristaltic crawling by the earthworm *lumbricus terrestris* [J]. *Journal of Experimental Biology*, 1999, 202(5):661-674.
- [15] van Griethuisen L I, Trimmer B A. Locomotion in caterpillars[J].*Biological Reviews*,2014,89(3):656-670.
- [16] Jayne B C, Davis J D. Kinematics and performance capacity for the concertina locomotion of a snake (*coluber constrictor*) [J]. *Journal of Experimental Biology*, 1991, 156 (1) : 539-556.
- [17] Chernousko F L. On the motion of a body containing a movable internal mass [J]. *Doklady Physics*, 2005, 50(11) : 593-597.
- [18] Fang H B, Xu J. Dynamics of a mobile system with an internal acceleration-controlled mass in a resistive medium [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2011, 330(16) : 4002-4018.
- [19] Chernousko F L. On the optimal motion of a body with an internal mass in a resistive medium [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2008, 14(1/2) : 197-208.
- [20] Majewski T, Szwedowicz D. Locomotion of a Mini Bristle Robot With Inertial Excitation [J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2017, 9(6) : 061008.
- [21] Guo B Y, Liu Y, Birlir R, et al. Self-propelled capsule endoscopy for small-bowel examination: proof-of-concept and model verification [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 174: 105506.
- [22] Yan Y, Liu Y, Páez C J, et al. Proof-of-concept prototype development of the self-propelled capsule system for pipeline inspection [J]. *Meccanica*, 2018, 53(8) : 1997-2012.
- [23] 郭俞良, 郭瑞, 唐陈伟, 等. 带外鳍振动驱动机器人的运动机理及试验研究 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2023, 44(10) : 1448-1454.
(Guo Yu-liang, Guo Rui, Tang Chen-wei, et al. Motion mechanism and test study of vibration driven robot with external fins [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2023, 44(10) : 1448-1454.)
- [24] Yaguchi H, Itoh Y. Vibration actuator system with small-scale size capable of visual inspection of large complex iron structures [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(16) : 7467.

(上接第 67 页)

- (Xiao An-jian, Li Hong-jun, Dai Shui-dong, et al. Study on the influence of kinematic pair clearance on the dynamic characteristics of MCCB manipulator [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2024, 43(10) : 1654-1663.)
- [9] Bai Z F, Liu T X, Li J Y, et al. Numerical and experimental study on dynamic characteristics of planar mechanism with mixed clearances [J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2023, 51(11) : 6142-6165.
- [10] Yao S B, Luo Z, Wei K, et al. Analysis of fluid-solid-thermal coupling characteristics of axial-symmetric vectoring exhaust nozzle [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, 236(17) : 9472-9484.
- [11] Wang X Y, Wang H F, Zhao J C, et al. Rigid-flexible coupling dynamics modeling of spatial crank-slider mechanism based on absolute node coordinate formulation [J]. *Mathematics*, 2022, 10(6) : 1-13.
- [12] 刘洋, 赵志刚, 李维维, 等. 轴对称推力矢量喷管喉道面积的精度分析与补偿 [J]. *机械科学与技术*, 2018, 37(7) : 1137-1142.
(Liu Yang, Zhao Zhi-gang, Li Wei-wei, et al. Precision compensation of throat area for axial-symmetric vectoring exhaust nozzle [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2018, 37(7) : 1137-1142.)
- [13] 柳亚冰, 符大伟, 蔡常鹏, 等. 轴对称矢量喷管空间动力学建模仿真 [J]. *航空发动机*, 2020, 46(6) : 34-40.
(Liu Ya-bing, Fu Da-wei, Cai Chang-peng, et al. Modeling and simulation of spatial kinematics of axisymmetric vectoring nozzle [J]. *Aeroengine*, 2020, 46(6) : 34-40.)
- [14] 闫世洲, 赵志刚, 霍树林. 轴对称矢量喷管出口 Lagrange 动力学分析 [J]. *机械科学与技术*, 2019, 38(5) : 809-815.
(Yan Shi-zhou, Zhao Zhi-gang, Huo Shu-lin. Lagrange dynamics analysis of axisymmetric vector nozzle [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2019, 38(5) : 809-815.)
- [15] Marques F, Roura I, Silva M T, et al. Examination and comparison of different methods to model closed loop kinematic chains using Lagrangian formulation with cut joint, clearance joint constraint and elastic joint approaches [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2021, 160 : 104294.
- [16] Lankarani H M, Nikravesh P E. A contact force model with hysteresis damping for impact analysis of multibody systems [J]. *Journal of Mechanical Design*, 1990, 112(3) : 369-376.
- [17] Marques F, Flores P, Claro J C P, et al. A survey and comparison of several friction force models for dynamic analysis of multibody mechanical systems [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2016, 86(3) : 1407-1443.
- [18] Skrinjar L, Slavič J, Boltežar M. A review of continuous contact-force models in multibody dynamic [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 145 : 171-187.